

多孔介质中渗流致细颗粒运移实验探讨¹⁾

罗大双^{*,+}, 王晶^{*,+}, 张旭辉^{*,+2)}, 鲁晓兵^{*,+}

^{*} (中国科学院力学研究所, 北京 100190) ⁺ (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 多孔介质中渗流引起的细颗粒运移是自然界普遍存在的现象, 如管涌、油气开采中的出砂等。细颗粒在多孔介质孔隙内的冲刷、重沉积以及多孔介质的变形是典型的流-固耦合力学问题。本文以粉细砂、钙质砂、人工砂和塑料砂等不同颗粒级配和细颗粒含量的土体类型为实验介质, 采用圆柱形有机玻璃管模拟一维渗流致出砂, 探讨岩土中渗流导致出砂的基本现象和特征, 分析了细颗粒含量和渗流压差对出砂的影响。实验结果表明: 颗粒级配及细颗粒含量确定土体骨架的孔隙结构及颗粒间相互作用形式, 在一定渗流压差下, 渗流致出砂主要取决于多孔介质孔隙大小以及细颗粒占比; 对于某一颗粒级配, 可以发生出砂的情况下, 出砂量与渗流压差呈现正相关, 渗流压差越大, 出砂程度越高。

关键词: 细颗粒运移; 颗粒级配; 渗流压差; 出砂

引言

多孔介质中渗流引起的细颗粒运移是自然界普遍存在的现象, 在岩土工程、油气资源开采过程中尤为显著。土石坝中局部细颗粒运移, 逐渐形成大的孔隙通道, 引起管涌而导致溃坝^[1]; 天然气水合物降压开采中, 水合物分解后土体软化, 细颗粒逐渐由气液流动携带到生产井内, 引起堵井或者机械磨损事故, 使开采终止^[2-3]; 西南山区地表土体在强降雨和渗流作用下, 细颗粒流失, 导致土体强度降低, 发生水土流失、滑坡或者泥石流灾害^[4-5]。这些问题均涉及含细颗粒渗流这一重要科学问题, 造成了大量的人员伤害和经济损失, 因此, 引起了国内外学者的广泛关注。

周健^[6]等利用基于散体介质理论的三维颗粒流方法, 充分考虑流-固耦合作用, 从细观角度模拟得到管涌发展过程中孔隙率、流速、颗粒流失量、颗粒间的接触数和应力场等的宏微观动态变化过程。

雷海燕^[7]等在圆管中填充玻璃珠构造多孔介质, 开展了含微小颗粒(粒径分别为 12.96 μm 和 22.81 μm) 流体在多孔介质(平均粒径 408.9 μm 和 659.2 μm) 中渗流特性实验模拟, 对比研究含颗粒流体质量浓度在 0.3~2.0 g/L 范围下, 颗粒在多孔介质界面处及内部沉积的影响规律。实验结果表明: 当颗粒粒径为 12.96 μm 时, 颗粒在多孔介质内部的沉积量远大于在界面处的沉积量; 当颗粒粒径为 22.81 μm , 流体浓度 $C < 0.3 \text{ g/L}$ 时二者相差不大; $C > 0.5 \text{ g/L}$ 时颗粒在介质内部的沉积量小于界面处沉积量, 且二者差值随着流体浓度的增大而增大。

鞠斌山^[8]等利用多相流体连续性方程和细颗粒剥落与运移理论, 建立了描述多孔介质中细颗粒运移过程的三维数学模型, 通过有限差分法和 LSOR 迭代等数值方法, 分析细颗粒运移量和渗透率变化, 并采用实验数据验证了模型的适用性。

Narong Touch^[9]等利用实验手段研究垂向饱和和砂土柱在渗流过程中细颗粒的沉积引起的砂土渗透率的变化特征。实验结果表明: 渗透率与渗流速度和沉积物特性有关, 随着渗流速度的增大, 或者沉积物中有机细颗粒的增多, 渗透率会显著减少。

Jalel Ochi^[10]等建立了二维网络模型模拟多孔介质在注水驱替过程中, 细颗粒剥落、运移和沉积引起的渗透率的变化规律。研究表明: 细颗粒剥落量取决于微观流动速度与临界速度两者之差; 多孔介质渗透率减少与多孔介质变形、细颗粒沉积和扩散这三种机理所引起的孔隙喉道半径减少密切相关。

国内外学者主要研究了多孔介质中渗流引起的细颗粒剥落、运动与沉积, 以及相应的渗透率变化特征, 但多孔介质的颗粒级配以及孔隙结构对渗流致出砂的影响规律的尚未研究清楚。因此, 本文拟采用实验手段, 探讨多孔介质中细颗粒运移的基本现象和出砂演化特征, 分析颗粒级配和渗流压差对渗流导致出砂的影响。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

本实验采用自主研制的简易渗流出砂模拟实验装置，该装置主要由三个模块组成：供水模块、实验模块和测量模块。

(1) 供水模块由气泵、调压阀、储水罐组成。气泵由江苏华安科研仪器有限公司生产制造，功率为 0.45kW，最大压力 0.8MPa；调压阀用于控制渗流压差，原理是截流减压，调压范围为 0-0.6MPa；储水罐为圆柱形，由有机玻璃制成，直径为 13cm，高度为 33cm，最大可承受 1MPa 压力。

(2) 实验模块由有机玻璃管、多孔介质和筛网组成。透明有机玻璃管直径为 4.2cm，长度为 35.0cm，体积为 490cm³，便于观察水的流动和多孔介质的变形；筛网由不锈钢制成，网眼孔径为 0.15mm。

(3) 测量模块由压力表、电子天平和量筒。压力表原理是其内部具有弹性敏感元件，利用流体引起的弹性变形，机械带动指针偏转产生读数，其量程为 0-0.6MPa，精度为 0.01MPa；电子天平量程为 5000.00g，精度为 0.01g，用于实时测量渗流过程的出砂与出水总量。

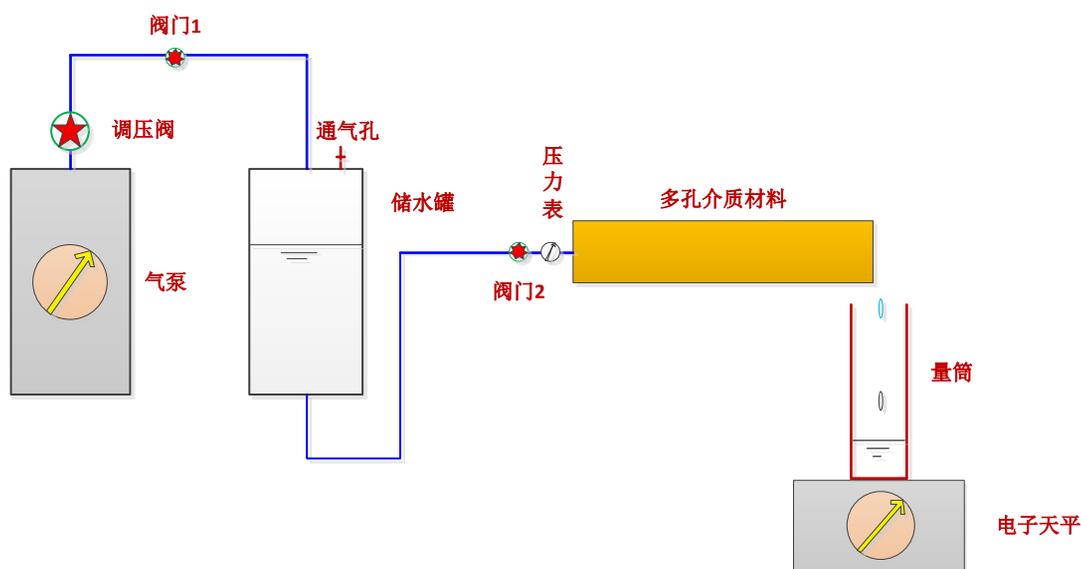


图 1 实验装置示意图

Fig.1 The diagram of the experimental apparatus

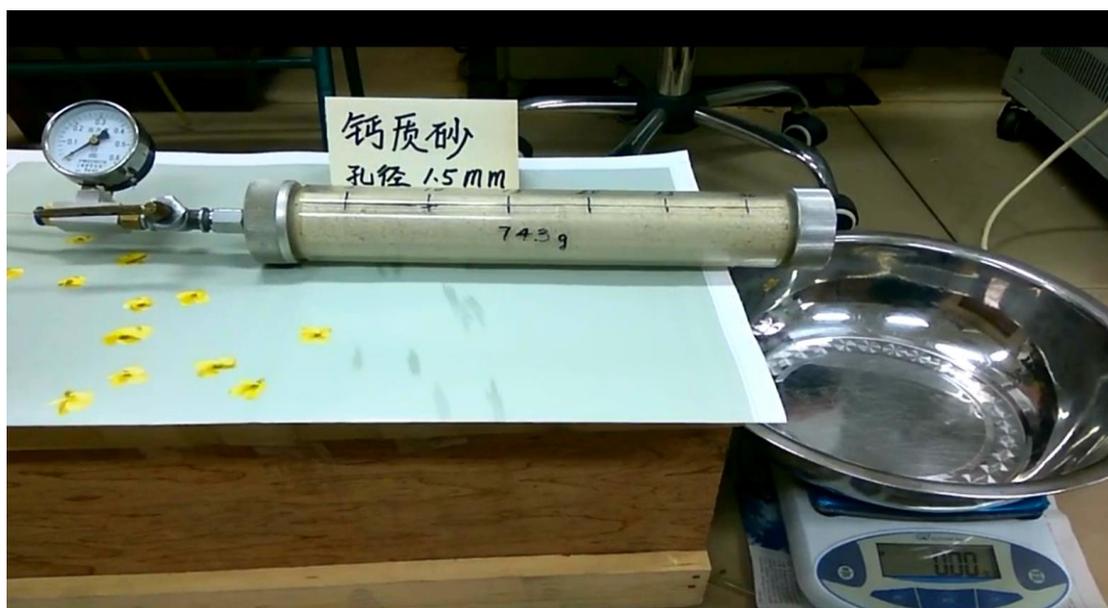


图 2 实验装置实物图

Fig.2 The physical picture of the experimental apparatus

1.2 多孔介质材料

本实验采用粉细砂、钙质砂、人工砂和塑料砂作为多孔介质材料，基本物性参数如表 1 所示，颗粒级配曲线如图 3 所示。考虑颗粒粒径在 0.075mm 以下的颗粒称为细颗粒，粉细砂含有一定量的粘土细颗粒；钙质砂不含细颗粒；人工砂颗粒由两种粒径不同的塑料珠，外加一定量的灰色粘土按照一定比例混合制成，大塑料珠粒径为 0.168cm，小塑料珠粒径为 0.067cm，粘土颗粒粒径在 0.075mm 以下，作为多孔介质的细颗粒，质量比为 4:1:1；塑料砂颗粒与人工砂中的塑料珠颗粒相同，只有这两种颗粒，无细颗粒存在，质量比为 4:1。

表 1 多孔介质材料物理性质参数

Table 1 Physical properties of materials

	粉细砂	钙质砂	人工砂	塑料砂
比重	2.69	2.73	2.71	2.68
干密度 (g/cm^3)	1.60	1.60	1.55	1.57
是否含有细颗粒	是	否	是	否

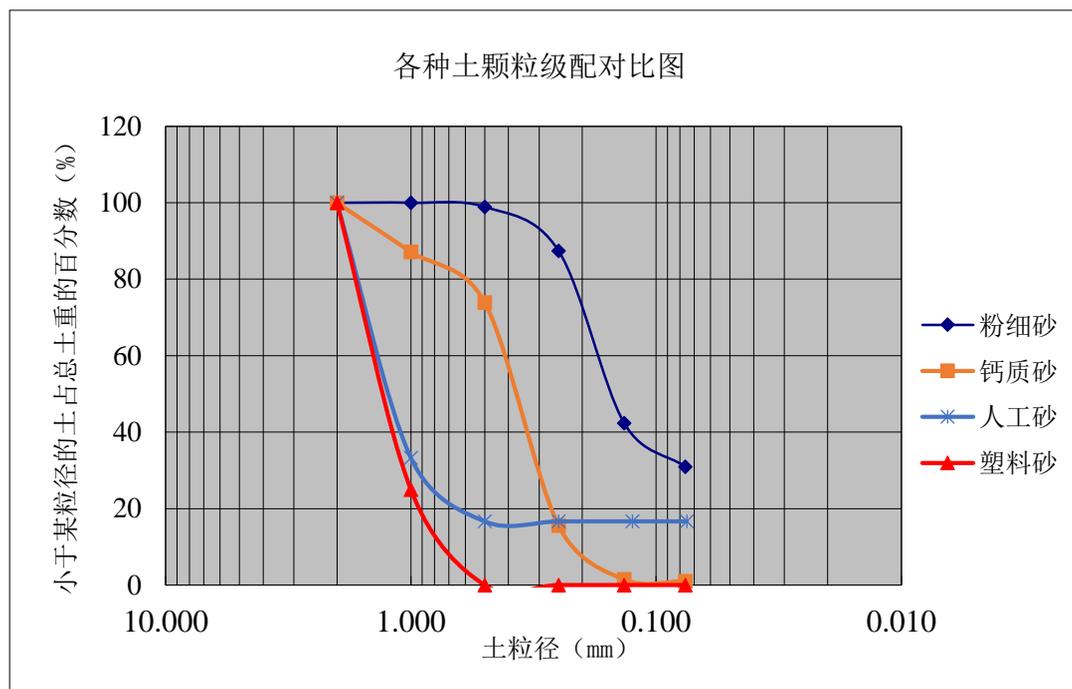


图 3 各种土颗粒级配曲线图

Fig.3 Various soil particle grading curves

1.3 实验方法

实验之前按照如表 1 所示干密度在有机玻璃管内分层制备，保证多孔介质材料的均匀性。实验时，打开电子天平，放上量筒，将读数归零；然后关闭阀门 1 和阀门 2，打开调压阀门，将压力调整到指定读数，再依次打开阀门 2 和阀门 1，此时实验开始；当出水口出水时开始计时，并录像采集数据，实验结束后，分离出水中的细颗粒，称重并记录。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

开始注水后，由于制备的多孔介质材料处于非饱和状态，首先观察到一个类似活塞推进的移动界面现象，当界面达到出水口时，多孔介质孔隙空间基本充满水，而后观测渗流出砂现象与数据。

(1) 粉细砂：首先在渗流压差下出现压缩压密现象，然后水的渗流逐渐携带细颗粒流出，瞬时出砂量逐渐减少，直至出水量与出砂量均很小，实验停止。分析可能原因是渗流过程中，部分细颗粒随水的流动流出，局部渗透性增加而流速降低，部分细颗粒在孔隙中聚集、沉积，局部孔隙尺寸变小，引起渗流场的不连续性，水和细颗粒的流动速度与路径改变，但更容易聚集、沉积，从而引起多孔介质的整体渗流性降低。在不同渗流压差作用下，细颗粒运移量也显著不同，图 4 为粉细砂多孔介质中细颗粒出砂量随渗流压差变化，纵坐标出砂百分比为出砂量与多孔介质总质量之比，从图中可以看出，出砂量与渗流压差呈现线性相关。

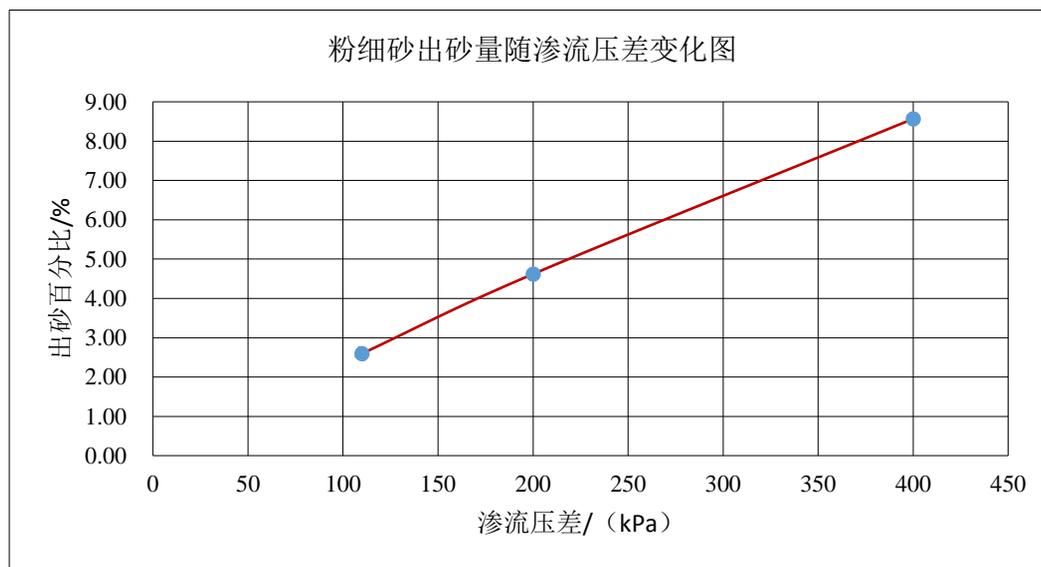


图 4 粉细砂出砂量随渗流压差变化图

Fig.4 The diagram of fine grain production with pressure difference

(2) 钙质砂。在 0-0.6MPa 的渗流压差作用下，只有清水连续流出，未出现出砂现象和明显多孔介质的变形现象。分析主要原因是钙质砂中无细颗粒，孔隙尺寸与颗粒尺寸相当，且渗流速度不高，因此，不具备出砂条件。

(3) 人工砂。在实验中清晰地观察到塑料珠之间孔隙中的细粘土颗粒逐渐被水携带流出过程，出砂液的颜色先深后浅，即浓度逐渐降低，最后是清水流出；在不同渗流压差作用下，出砂量显著不同。图 5 为人工砂出砂量分别占细颗粒总质量与占多孔介质总质量百分比随渗流压差变化图，从图中可以看出，细颗粒运移量与渗流压差呈线性相关。

(4) 塑料砂。在 0-0.6MPa 的渗流压差作用下，只有清水不断流出，与钙质砂的现象一致。

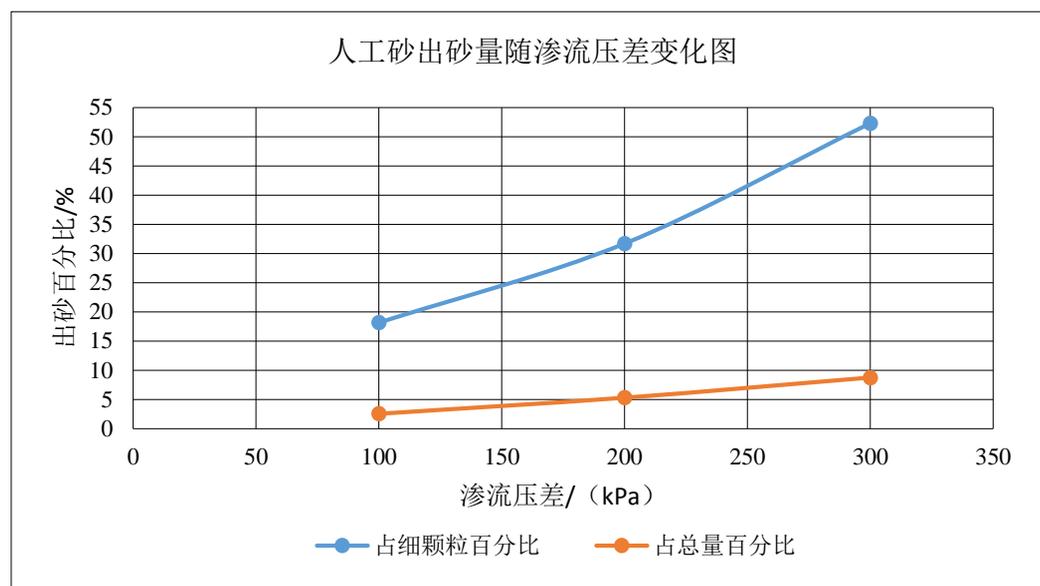


图 5 人工砂出砂量随渗流压差变化图

Fig.5 The diagram of fine grain production with pressure difference

2.2 结果分析

土的颗粒级配体现了土中不同粒径范围土颗粒的分布状况^[11]，一定程度上决定了颗粒与颗粒之间相互结合方式和孔隙结构。因此，不同的多孔介质具有不同的颗粒级配，而且土体骨架结构与颗粒间的相互作用形式也存在着差异。含有细颗粒的多孔介质，大颗粒之间和孔隙中存在着容易剥离的细颗粒，一定渗流流速引起细颗粒的剥离骨架并在孔隙中流动，部分细颗粒会从多孔介质中运移出来。细颗粒的剥离与运移，引起多孔介质局部孔隙尺寸和渗透率的增加，更大的颗粒可以运移出来，同时由于孔隙结构的不均匀性，细颗粒也会在运移过程中聚集与沉积，堵塞局部渗流通道，不同的颗粒级配及其孔隙结构决定了这一现象的发展方向，这是一种典型的流-固耦合相互作用过程。分析这四种多孔介质材料的颗粒级配和实验结果，可以发现粉细砂中含有细颗粒，渗流过程中先出砂后堵塞；人工砂中含有细颗粒，渗流过程中出现出砂而未堵塞；钙质砂与塑料砂不含有细颗粒均未出现出砂现象。

由达西定律^[12]可知，流体在多孔介质中运动，渗流速度或流量与压差成正比，压差越大，渗流速度与流量越大。在渗流致细颗粒运移实验中，由于出砂质量百分比小，对多孔介质总体孔隙度的影响不明显，可以认为多孔介质的孔隙度不变，多孔介质中的细颗粒与水均匀混合流动，渗流流量与压差亦成正比，从而出砂量也与渗流压差成正比。从粉细砂与人工砂这两种多孔介质的实验中，细颗粒流出量随渗流压差增大而增大，两者呈现正相关关系，这与上述分析是一致的。

3 结论

本文利用实验室渗流出砂土的简易实验装置，进行了四种多孔介质中渗流致细颗粒运移实验，从实验结果中分析，可以得到以下两个结论。

(1) 颗粒级配及细颗粒含量确定土体骨架的孔隙结构及颗粒间相互作用形式，在一定渗流压差下，渗流致出砂现象主要取决于多孔介质中细颗粒含量及孔隙结构大小。

(2) 对于某一颗粒级配，可以发生出砂的情况下，出砂量与渗流压差呈现正相关，渗流压差越大，出砂程度越高。

本文研究了渗流导致细颗粒运移的宏观现象和数据，而如何追踪细颗粒运动，定量描述细颗粒剥离、运移、聚集与沉积过程，揭示宏微观流固耦合力学行为的关联，则需要开展渗流过程的实时微观 CT、核磁等测量。

致谢：本文受到国家自然科学基金（Nos. 51639008，41376078）和中国石油-中国科学院科技合作项目（2015A-4813）资助。

参考文献

- 1 罗玉龙,速宝玉,盛金昌等. 对管涌机理的新认识. 岩土工程学报, 2011, (12):1895-1902 (Luo Yulong, Su Baoyu, Sheng Jinchang. et al. New understandings on piping mechanism, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,(12):1895-1902 (in Chinese))
- 2 Ashford, D.I., Mizuta, T., Dallimore, S.R., et al. Overview of engineering and operations activities conducted as part of the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik 2007-2008 Gas Hydrate Production Research Well Program, Part A: 2007 field program, Geological survey of Canada, Bulletin 601, 2012
- 3 Hancock, S.H., Collett, T.S., Dallimore, S.R., et al. Overview of thermal stimulation production-test results for the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, Geological Survey of Canada Bulletin 585
- 4 矫滨田,鲁晓兵,王淑云等. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应. 地下空间与工程学报, 2005,(S1):36-38 (Jiao Bingtian, Lu Xiaobing, Wang Shuyun, et al. The Movement of Fine Grains and Its Effects on the Landslide and Debris Flow Caused by Raining, Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,(S1):36-38 (in Chinese))
- 5 张磊,张璐璐,程演等. 考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析. 岩土工程学报,2014,(09):1680-1687 (Zhang Lei, Zhang Lulu, Cheng Yan, et al. Slope stability under rainfall infiltration considering internal erosion, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,(09):1680-1687 (in Chinese))
- 6 周健,姚志雄,张刚. 基于散体介质理论的砂土管涌机制研究. 岩石力学与工程学报,2008,(04):749-756 (Zhou Jian, Yao Zhixiong, Zhang Gang. Research on piping mechanism in sandy soils based on discrete element theory. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,(04):749-756 (in Chinese))
- 7 雷海燕,崔明杰,戴传山等. 微小颗粒在多孔介质中运移的实验研究. 中国科学院大学学报,2017,(02):251-258 (Lei Haiyan, Cui Mingjie, Dai Chuanshan, et al. Experimental study of migration of micro particles in porous media, Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(2): 251-258. (in Chinese))
- 8 Binshan Ju, Tailiang Fan, Xiaodong Wang, et al. A new simulation framework for predicting the onset and effects of fines mobilization. Transport Porous Media,2007, 68: 265-2283
- 9 Narong Touch, Tadashi Hibino, Shinya Nakashita. Permeability reduction by sediment retention in saturated sand columns. Transport Porous Media, 2013, 98: 615-630
- 10 Jalel Ochi, Jean-Francois, Vernoux. A two-dimensional network model to simulate permeability decrease under hydrodynamic effect of particle release and capture. Transport in Porous Media, 1999, 37: 303-325
- 11 黄文熙. 土的工程性质.北京: 水利电力出版社, 1983 (Huang Wenxi. The engineering properties of soil. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1983(in Chinese))
- 12 孔祥言. 高等渗流力学.合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010 (Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluid Flow in Porous Media. Hefei: University of science and technology of China press,2010(in Chinese))

The Experimental Study On The Seepage Induced Migration Of Fine Particles In Porous Media¹⁾

Luo Dashuang^{*,+}, Wang Jing^{*,+}, Zhang Xuhui^{*,+,2)}, Lu Xiaoabing^{*,+}

⁺(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^{*}(*university of Chinese academy of sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Seepage induced migration of fine particles in porous media (SMFPPM) is a ubiquitous phenomenon during the physical processes of piping, sand production in oil and gas, etc. The scouring, and deposition of fine particles, accompanying the deformation of porous media are typical fluid-solid interacting mechanical behaviors. The experiments on SMFPPM are conducted by using fine sand, calcareous sand, artificial sand and plastic sand, considering the effects of grain size distribution, pressure difference and content of fine particles. The results show that: The grain size distribution and content of fine particles determine the pore structure and the interaction between particles in the porous media; SMFPPM occurs under the condition of fine particles existence and pore structure; For a certain particle size distribution and under the condition of sand production, the sand production increases with the increase of pressure difference approximately linearly.

Key words: Fine particle migration, Grain size distribution, Pressure difference, Sand production